

# 基于透明土的黏土边坡土体变形特征试验

刘强,吴能森,许旭堂

(福建农林大学 交通与土木工程学院,福建 福州 350002)

**摘要:** 利用透明土模型试验非介入式、可视化的优点,结合 PIV(粒子图像测速)技术研究坡顶分级荷载下黏土边坡土体变形规律。试验结果表明:黏土边坡在滑移过程中,土体位移量加速积累,土体变形主要分为稳定、加速和破坏3个阶段;黏土边坡在失稳过程中土体沿坡顶至坡脚半径最大圆弧面滑动,随荷载不断增加,会在边坡内部形成半扇形区域滑裂带。

**关键词:** 黏土边坡;土体变形特征;透明土;圆弧滑动面

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)06-0532-05

## Experiment on soil deformation characteristics of clay slope based on transparent soil

LIU Qiang, WU Nengsen, XU Xutang

(College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The advantages of the non-intrusion and visualization of the transparent soil model test were taken in combination with the PIV (particle image velocimetry) to study the soil deformation law of the clay slope under the graded load of the slope top. Test results show that during the sliding process of the clay slope, the soil displacement accelerates and accumulates. Soil deformation is mainly divided into three stages: stable stage, acceleration stage and failure stage. During the instability process of clay slope, the soil mass slides along the maximum arc surface from the top of the slope to the toe of the slope. With the increasing load, a semi fan-shaped regional slip zone will be formed inside the slope.

**Keywords:** clay slope; soil deformation features; transparent soil; circular sliding surface

边坡防护治理一直以来是岩土工程领域关注的热点,充分了解边坡滑移过程中土体变形特征,对其做出提前预警和早期预防尤为重要。目前,许多学者采用数值模拟计算、室内模型试验、现场原位监测或3种相互结合的研究方法对边坡失稳过程中土体变形特征展开研究。其中,模型试验是研究边坡滑动机理的重要手段,罗强<sup>[1]</sup>、汤连生<sup>[2]</sup>、龚建<sup>[3]</sup>等通过室内模型试验分别对砂性土边坡、黏性土边坡和土石混合边坡稳定性进行了分析研究。以上模型试验研究初步探明了常见的边坡类型在失稳情况下土体变形特征,但少有研

究从微观角度观测土体内部位移场的变化和渐进性的失稳过程,特别是黏土边坡研究仍存在空白。

透明土是由透明固体颗粒及与其折射率相匹配的透明孔隙溶液所组成的两相介质,经学者验证<sup>[4-5]</sup>,不同材料配置的透明土具有砂土和黏性土的物理力学特性。随着 PIV 技术在各个领域广泛应用,一种由透明土模型试验结合 PIV 技术逐渐运用在岩土工程中。Ding 等<sup>[6]</sup>通过常规土工试验测定透明土的物理力学性质与天然砂土相似,验证了透明土模拟土石混合体的可行性。随后采用此技术对土石混合体压缩变形展开研究<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(XJQ202014)

第一作者简介: 刘强(1994—),男,四川乐至人,硕士研究生,研究方向:岩土与地下工程。

通信作者: 吴能森(1964—),男,福建福清人,教授,博士,研究方向:岩土与地下工程。

曹兆虎<sup>[8]</sup>、周航<sup>[9]</sup>、杜明芳<sup>[10]</sup>等通过透明土试验和 PIV 技术相结合的方法,分析了不同桩型的沉桩挤土效应。王壮<sup>[11]</sup>、张建伟<sup>[12]</sup>等对砂土边坡的土体破坏特征进行了研究。

本研究将利用透明土可视化、非介入式、无损测量等优点,结合粒子图像测速技术研究在分级荷载下黏土边坡土体变形特征,可为黏土边坡防护工程提供重要的理论依据。

表 1 透明土配制材料基本物理指标

Tab.1 Basic physical indexes of transparent soil preparation materials

材料	颜色外观	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	熔点/°C	22°C时材料的折射率
沉淀白炭黑	白色粉末	2.320~2.650	1 750	1.442 0
15号白油	无色液体	0.815~0.832	-24	1.458 5
正十二烷	无色液体	0.748~0.751	-9.6	1.421 5
钛白粉	白色粉末	3.840~4.260	1 560	2.700 0

## 1.2 试验设备装置

模型箱和基岩模型均采用透明亚克力材料制作,模型箱内径尺寸为长 40 cm,宽 15 cm,高 30 cm,内置坡面打磨处理后的基岩模型,基岩模型坡面长 40 cm,宽 15 cm,高 20 cm,坡角 30°。试验设备主要有温度检测器、激光发射器、CCD 工业相机、加载平台、计算机、砝码和真空器等。其中激光发射器采用 LSR520CPD-2W-LN 型号,最大工作电流 1.74 A,最大输出功率 2.080 W。真空泵采用 2X-15 型号,运行功率 3 kW,抽气速率 15 L/s。

## 1.3 试验方法及过程

透明土制备流程:在室温 22 °C 条件下,选取 15 号白油和正十二烷按照质量比 1 : 1 配制混合溶液,采用高速分散机均匀搅拌 4~5 min,期间散入适量钛白粉,分散机转速控制在 500~800 r/min;混合溶液静置 1~2 min,采用 2WA-J 型号阿贝折射仪测得混合溶液折射率与沉淀白炭黑相同(1.442);将沉淀白炭黑缓慢倒入配置好的混合溶液中并用高速分散机搅拌均匀,分散机转速控制在 1 500~2 000 r/min,沉淀白炭黑与混合溶液按质量比 1 : 5 配制;将配置好的透明土移入模型箱,放入真空器中,在负压 0.1 MPa 条件下除气 1 h 后静置 40 min;待气泡完全去除后采用砝码堆载预压 60 kg(10 kPa)荷载,将土样分层固结 2 d,

# 1 透明土模型试验

## 1.1 透明土制备材料

采用 0.23 μm 沉淀白炭黑(无定型硅石粉末)模拟固体颗粒,采用化妆品级 15 号白油和正十二烷的混合溶液作为孔隙溶液。为制造良好的散斑点,且不与透明土配置材料发生反应,以化妆品级钛白粉作为示踪粒子,钛白粉主要成分为二氧化钛。配制材料基本物理指标如表 1 所示。

本次试验分两层进行,每层预压前高度为 15 cm,采用数字位移监测器监测土样沉降量达到《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup>规定后形成坡面,边坡土样垂直高度 10 cm,宽 15 cm,坡上台阶长 10 cm,坡面长 18 cm,坡角 30°。成坡后试验模型示意图如图 1 所示,其中坡中垂直断面取自坡面 1/2 长度处,由于下台阶区域的土体无明显变化,在本次试验中不作为分析区。

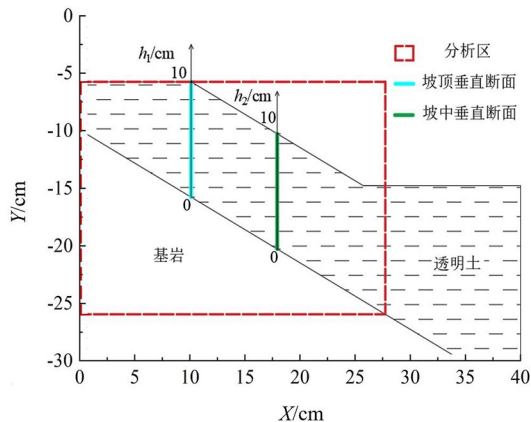


图 1 试验模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of test model

## 1.4 加载工况

试验时在边坡上台阶放置厚 1 cm 的透明亚克力材质加载板,加载板截面尺寸为 15 cm×10

cm,采用砝码在坡顶按每级 1 kg(0.67 kPa)进行加载,激光切面位置在宽度方向 7.5 cm 处,激光发射器工作电流设置为 1.7 A,CCD 相机放置在距模型箱正前方 30 cm 处,相机设置每 30 s 拍摄一张照片,每加载一次拍摄 5 张照片并储存,为保证加载过程的连续性,取一组照片后再次加载,加载时间间隔不超过 5 s。由于 15 号白油和正十二烷的折射率受温度影响较大,试验过程中需保持室内温度为配置混合溶液时的温度 22 ℃,温差不超过±1 ℃。

## 2 分级荷载下土体变形特征分析

### 2.1 黏土边坡土体变形特征

通过 PIVLab 图像分析软件对黏土边坡坡顶分级加荷过程中拍摄的照片进行处理,得到土体的位移矢量图和速度云图。

图 2 描述了坡顶荷载从 0 增加至 6 kg(4 kPa)过程中黏土边坡土体位移矢量和速度变化规律,由图 2 可看出,土体位移矢量接近圆点状,最大土体位移速度仅为 8  $\mu\text{m/s}$ ,分布在坡顶区域,无明显的连续性,土体位移速度仅在坡顶区域内发生小幅度变化,且影响范围很小。

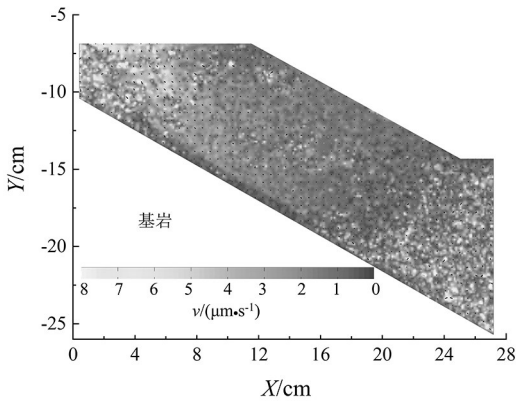


图 2 稳定阶段土体位移矢量图和速度云图

Fig.2 Soil displacement vector diagram and velocity cloud map in stable stage

图 3 反映了坡顶和坡中垂直断面上土体位移速度大小变化规律,在两断面上速度总体小于 4  $\mu\text{m/s}$ ,并且没有规律性的变化,说明在此过程中,坡内土体仅在周边小范围内发生蠕动,未发生明显的位移,此阶段为稳定阶段。

图 4(a)(b)(c)分别为坡顶荷载在 7、9、12 kg 时土体位移矢量和速度云图,坡顶荷载加至 7

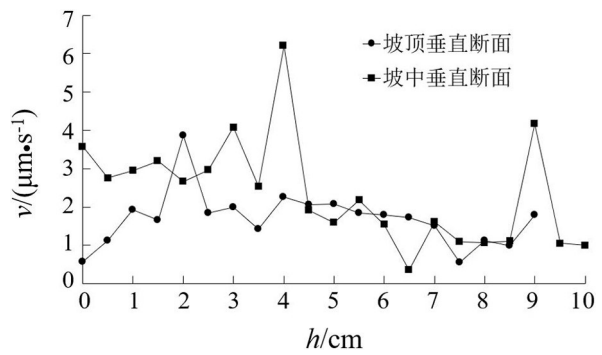


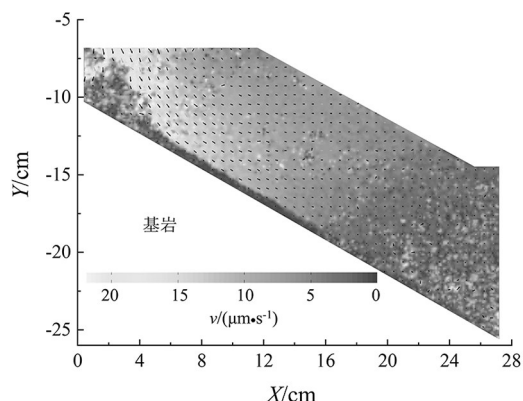
图 3 荷载 6 kg 下坡顶和坡中垂直断面速度大小变化规律图

Fig.3 Variation Law of vertical section velocity at the top and middle of slope under 6 kg load

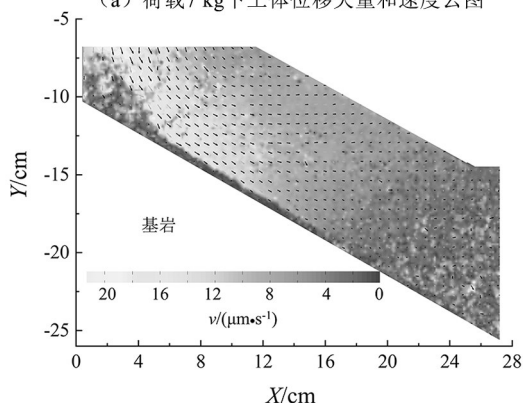
kg(4.67 kPa)时,坡顶区域内土体位移矢量箭头指向呈斜下的趋势,土体位移最大速度在 0.02 mm/s 左右,位移速度沿斜下 30°方向呈连续性变化,说明此时土体开始在边坡顶部区域发生明显位移;随着荷载增加至 9 kg(6 kPa)过程中,由位移矢量箭头方向可以看出,土体位移逐渐由边坡顶部向边坡中部延伸,土体位移轨迹由直线形逐渐过渡到圆弧形,坡中区域土体位移速度开始增大;持续加载至 12 kg(8 kPa)时,土体位移延伸至坡脚,坡脚区域的土体位移速度较 9 kg 时有所增大,由位移矢量箭头指向趋势可以看出,土体是沿坡顶至坡脚的圆弧滑动面移动。

图 5 和图 6 分别为坡顶荷载从 7 kg 加至 12 kg 过程中,坡顶和坡中垂直断面上土体位移速度大小变化规律图,土体位移速度随荷载的增加而逐渐增大,出现明显的分界,在坡顶垂直断面上以土体高度 1 cm 为界,土体位移在 0~1 cm 范围内速度较小,1~9 cm 范围内有明显增大,说明在该断面上,土体滑动面出现在土体高度约 1 cm 处,滑动面上覆土层随之下滑。同样地,在坡中垂直断面上以土样高度 5 cm 为界,土体位移速度大小变化有相同的规律,并且相同荷载下坡中土体位移速度较坡顶垂直断面速度小,这也说明土体位移是从坡顶向坡中延伸。经以上分析可知,土体位移在此阶段是由坡顶向坡中逐渐延伸,最后沿坡顶至坡脚的圆弧滑动面滑动,土体位移速度随荷载增大而逐渐增加,位移量加速积累,试验过程中发现,坡面开始出现裂缝,此阶段为加速阶段。

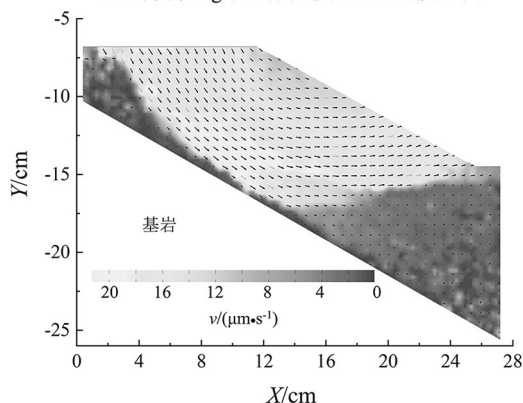
坡顶荷载继续增加至 13 kg(8.67 kPa)时,土



(a) 荷载7 kg下土体位移矢量和速度云图



(b) 荷载9 kg下土体位移矢量和速度云图



(c) 荷载12 kg下土体位移矢量和速度云图

图4 加速阶段各级荷载下土体位移矢量图和速度云图

Fig.4 Soil displacement vector diagram and velocity cloud map under various loads in acceleration stage

体瞬间沿圆弧滑动面滑动,出现较大位移和速度,由图7可见,土体位移速度峰值在0.25 mm/s左右,主要集中在坡顶至坡脚半径最大的圆弧滑动面附近。将荷载12 kg与13 kg时两断面上土体位移速度变化规律进行比较(图5、图6和图8)可以发现,坡顶垂直断面上土体位移平均速度由0.02 mm/s增加至0.23 mm/s,增加了10倍左右,最大速

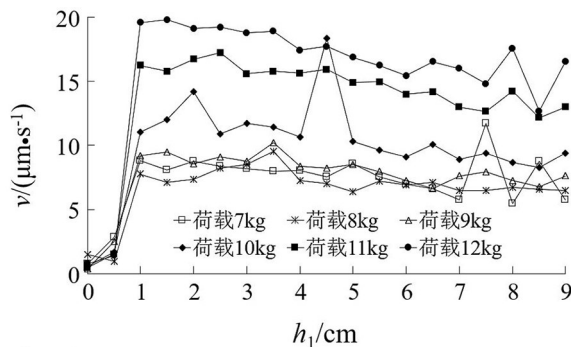


图5 加速阶段坡顶垂直断面速度变化规律图

Fig.5 Variation law of velocity in vertical section of slope top during acceleration stage

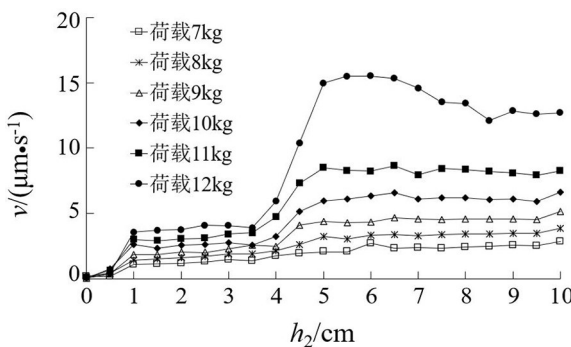


图6 加速阶段坡中垂直断面速度变化规律图

Fig.6 Variation law of vertical section velocity in slope during acceleration stage

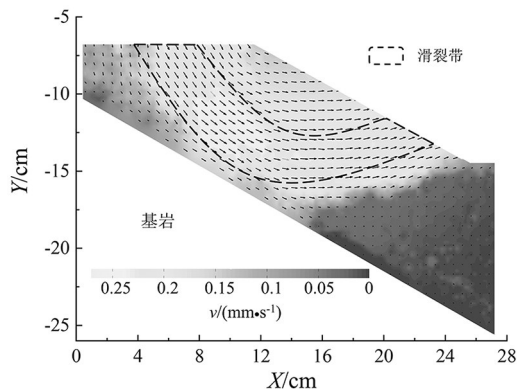


图7 破坏阶段土体位移矢量图和速度云图

Fig.7 Soil displacement vector diagram and velocity cloud map in failure stage

度差值0.24 mm/s,可见土体位移速度在此阶段急剧增加,边坡发生失稳破坏,这也反映了滑坡的瞬时性。同时可以发现,该断面上土样高度在0~1 cm范围内土体速度也发生了较大变化,这可能是由于孔隙溶液的黏滞系数较大,滑动面(土样高度1 cm处)上层土体滑动的同时对下层土体有拖拽

作用。同样地,在坡中垂直断面上土体位移速度变化有相同的规律。在试验过程中也发现坡面出现明显贯穿裂缝(图 9),此阶段为破坏阶段。

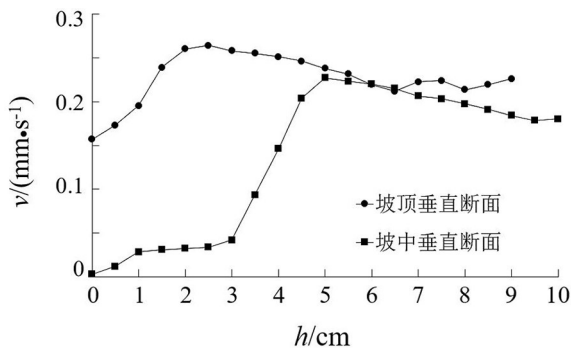


图 8 荷载 13 kg 下坡顶和坡中垂直断面速度变化规律图

Fig.8 Variation law of vertical section velocity at the top and middle of slope under 13 kg load

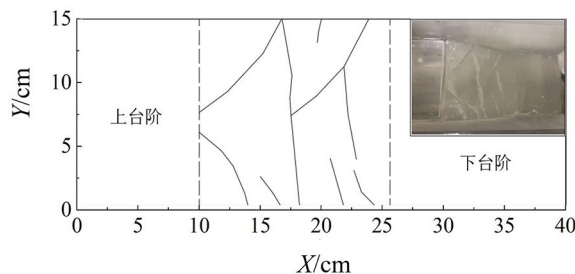


图 9 坡面贯穿裂缝示意图

Fig.9 Schematic diagram of slope penetration cracks

通过以上分析可知,黏土边坡在滑移过程中土体位移是逐渐积累的过程,呈加速趋势,坡内土体沿圆弧滑动面滑动,这与砂土边坡有明显区别。在整个滑移过程中,可以将土体变形分为稳定、加速和破坏 3 个阶段。

## 2.2 黏土边坡滑动面特征

黏土边坡在滑移过程初期,土体沿坡顶至坡脚的圆弧面滑动,随荷载不断增加,滑动面以上一定范围内的土体开始出现明显的位移,这也可能是由于土体孔隙溶液黏滞系数较大,对滑动面周围的土体有明显拖拽作用,随荷载的不断增大,在黏土边坡内部逐渐形成一条贯穿坡顶至坡脚的滑裂带。以破坏阶段为例,如图 7 所示,半扇形区域(宽约 4 cm)内土体位移速度明显大于周边土体位移速度,认为此时在坡体内已经形成了坡顶至坡角的贯穿滑裂带,在加速阶段末期同样可见此现象。

## 3 结论

1) 黏性边坡在坡顶加载过程中,土体位移随荷载的增加不断向坡中延伸,土体位移量加速积累,整个变形过程分为稳定、加速和破坏 3 个阶段。

2) 黏土边坡土体在失稳过程初期沿坡顶至坡脚半径最大圆弧面滑动,随荷载不断增加,在边坡内部逐渐形成自坡顶至坡脚的半扇形区域贯穿滑裂带。

## 参考文献:

- [1] 罗强,朱江江,张瑞国,等. 砂土边坡稳定性土工离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5):1252-1259.
- [2] 汤连生,钟明灯,赵占仑,等. 滑坡模型试验及滑坡演化规律的分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(5):75-80.
- [3] 龚健,刘君. 基于 PIV 分析的含石量对土石混合体边坡破坏过程及模式的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(3):696-704.
- [4] 孔纲强,李辉,王忠涛,等. 透明砂土与天然砂土动力特性对比[J]. 岩土力学, 2018, 39(6):1935-1940, 1947.
- [5] 宫全美,周俊宏,周顺华,等. 透明土强度特性及模拟黏性土的可行性试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6):853-860.
- [6] DING X H, ZHOU W, LU X, et al. Physical simulation test of soil-rock mixture from synthetic transparent soil[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(12):3085-3097.
- [7] 丁小华,周伟,罗怀廷,等. 基于透明土技术的土石混合体压缩变形试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1):157-164.
- [8] 曹兆虎,孔纲强,周航,等. 基于透明土的静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5):1363-1367, 1374.
- [9] 周航,袁井荣,刘汉龙,等. 矩形桩沉桩挤土效应透明土模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11):4429-4438.
- [10] 杜明芳,逄永新,徐志军,等. 深部缩径缺陷桩的透明土模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6):1436-1446.
- [11] 王壮,李驰,丁选明. 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2):185-188.
- [12] 张建伟,丁乐,樊亚龙,等. 基于透明土模型试验的卸载后土体变形分析[J]. 中国科技论文, 2022, 17(2):127-132, 140.
- [13] 水利部水利水电规划设计总院. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S].北京:中国计划出版社,2019.